

文章编号:1006-9941(2019)10-0812-07

初始裂纹对高聚物粘结炸药低速撞击点火影响数值模拟研究

刘睿,韩勇,代晓淦,李明,王军

(中国工程物理研究院化工材料研究所,四川 绵阳 621999)

摘要: 应用 Visco-SCRAM 模型和热点模型研究初始裂纹对奥克托今基(Octogen, HMX)高聚物粘结炸药(Polymer bonded explosive, PBX)炸药低速撞击点火的影响,主要针对标准低速撞击 Steven 试验进行模拟,分析初始裂纹尺寸和初始裂纹非均匀分布对 PBX 炸药内部温升及热点形成的影响。计算结果表明,随着初始裂纹尺寸的增加,HMX 基 PBX 炸药内部裂纹表面的摩擦生热增强,导致其内部温升明显,更容易形成热点。当初始裂纹尺寸从 1 mm 增加到 3 mm 时,点火速度阈值从 $45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降低到 $38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。考虑初始裂纹非均匀性影响,在低速撞击过程中,PBX 炸药内部温升区域发生明显的改变。而且,初始裂纹非均匀性有利于 PBX 炸药低速撞击过程热点形成,并导致点火速度阈值降低。当初始裂纹尺寸服从均匀分布 $U(0.8, 1.2)$ 时,点火速度阈值为 $36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。当初始裂纹服从正态分布 $N(1, 0.115)$ 时,点火速度阈值为 $31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

关键词: 爆炸力学;初始裂纹;PBX 炸药;低速撞击;点火速度阈值

中图分类号: O389

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2019152

1 引言

在低速撞击条件下高聚物粘结炸药(PBX)炸药点火问题受到广泛的关注^[1-2]。一方面,在炸药生产、输送、使用和贮存等过程中,由于碰撞或者跌落等低速撞击刺激,炸药存在意外点火的可能性。另一方面,由于炸药非均质细观结构的复杂性,炸药低速撞击点火行为变得难以预测^[3]。因此,研究炸药低速撞击点火行为具有重要的理论和实用价值。

相比于冲击点火,低速撞击产生更低的输入压力峰值(量级约 100 MPa)和更长的压力脉宽(量级约 1~10 ms)。为了实现具有低幅值、长脉宽特征的加载,发展了不同的动态加载技术,例如,霍普金森杆技术、落锤撞击、平板撞击等^[4-5]。美国国家实验室确定了一系列的炸药低速撞击点火的标准试验,例如,Steven 撞击试验、落锤撞击试验、Susan 撞击试验和 Spig-

ot 撞击试验,用于研究炸药低速撞击点火问题。Vandersall 等^[6]应用 Steven 撞击试验,设计了不同的弹头形状低速撞击试验,对炸药的点火进行评估。代晓淦等^[7]研究了 Steven 撞击试验中,不同的弹头形状对炸药的反应程度的影响。

对于低速撞击,炸药内部的初始裂纹演化过程对其点火反应有着极为重要的影响。Idar 等^[8]应用多次 Steven 撞击试验研究了含有缺陷炸药的点火响应。Chidester 等^[9]得到了含有损伤炸药在不同弹形撞击下速度阈值的变化规律。孙宝平等^[10]研究表明随着裂纹的累积,炸药越容易发生低速撞击点火。尽管通过低速撞击试验方法能够获得炸药点火的宏观规律,但是,炸药点火的微观机制,例如摩擦、剪切以及温度变化,很难通过试验观测。Bennett 等^[11]发展了基于微裂纹界面的摩擦生热的点火模型(Visco-SCRAM 模型),并应用该模型模拟了不同应变率条件下的炸药力学响应及温度变化。该模型可以描述微裂纹的张开、闭合以及扩展过程,同时,也描述了裂纹表面摩擦所引起的温度变化。基于该模型,楼剑锋等^[12]分析了热点尺度、应变率和裂纹界面压力对炸药点火的影响。杨康等^[13]考虑了材料应变率效应和裂纹扩展方向对 PBX 动态变形的影响。上述研究尽管讨论了炸药内部裂纹演化与点火响应关联性,但是,并没有充分地

收稿日期:2019-05-27;修回日期:2019-08-29

网络出版日期:2019-09-06

基金项目:国家自然科学基金项目(11902300)

作者简介:刘睿(1985-),男,助理研究员,主要从事含能材料爆轰安全性研究。e-mail:liurui_icm@126.com

通信联系人:韩勇(1976-),男,研究员,主要从事含能材料爆轰性能研究。e-mail:y_han76@126.com

引用本文:刘睿,韩勇,代晓淦,等.初始裂纹对高聚物粘结炸药低速撞击点火影响数值模拟研究[J].含能材料,2019,27(10):812-818.

LIU Rui, HAN Yong, DAI Xiao-gan, et al. Numerical Simulation on the Influence of the Initial Crack on Polymer Bonded Explosive Ignition Under Low Velocity Impact[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(10):812-818.

考虑初始裂纹特征尺寸和初始裂纹的非均匀性对PBX炸药点火的影响。大量研究表明,在炸药晶体合成、造粒和压制成型等不同阶段,PBX炸药内部均存在微裂纹,且微裂纹呈现复杂的空间分布和几何形貌特征^[14-15]。炸药内部随机分布微裂纹将影响材料动态塑性变形,进而影响材料内部裂纹表面摩擦形成热点^[16]。目前,尽管已有考虑PBX炸药晶体颗粒与粘结剂非均匀性的计算模型^[17-18],分析炸药内部结构在动态加载条件下的微观结构演化过程,但是,考虑炸药内部裂纹非均匀性的计算模型却鲜有报道。

本研究应用Visco-SCRAM模型和热点模型,分析材料初始裂纹对HMX基PBX炸药内部微裂纹表面摩擦温升的影响,特别是,详细讨论了初始裂纹特征长度和初始裂纹非均匀性分布特征对HMX基PBX炸药点火的影响,并获得了初始裂纹对点火速度阈值的影响规律,为认识初始裂纹对HMX基PBX炸药低速撞击点火影响提供参考。

2 计算模型

2.1 Visco-SCRAM模型和热点模型

Visco-SCRAM模型是由多个Maxwell粘弹性单元并联和随机微裂纹的损伤单元串联而成。公式(1)给出了Visco-SCRAM材料本构方程:

$$\dot{S}_{ij} = \frac{2G\dot{\epsilon}_{ij} - \sum_{n=1}^{n=5} \frac{S_{ij}^n}{\tau^n} - 3\left(\frac{c}{a}\right)^3 \frac{\dot{c}}{a} S_{ij}}{1 + \left(\frac{c}{a}\right)^3} \quad (1)$$

式中, \dot{S}_{ij} 代表了材料的偏应力率,MPa·ms⁻¹;G代表了材料的剪切模量,MPa; S_{ij}^n 和 τ^n 分别代表了第n个Maxwell粘弹性单元的偏应力,MPa,和松弛特征时间,ms;c代表了微裂纹体元中微裂纹的平均半径,mm;a代表了初始裂纹尺寸,mm。

一维Frank-Kamenetskii热传导模型可以被用来描述裂纹表面摩擦温升形成热点过程^[19]。公式(2)和(3)给出了一维Frank-Kamenetskii热传导模型:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(k_f \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \rho_f \Delta H Z e^{-\frac{E}{RT}} + \mu \rho \frac{\partial v_x}{\partial y} = \rho_f c_f \frac{\partial T}{\partial t} \quad l_f \geq y \geq 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \rho_s \Delta H Z e^{-\frac{E}{RT}} = \rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

式中, k_i 为材料的热传导系数,g·m·s⁻³·K; c_i 为比热容,mm²·ms⁻²·K⁻¹,下标f和s分别代表了液相和固相; ΔH 代表了爆轰热,m²·s⁻²;Z,E和R分别代表了指前因子,ms⁻¹,活化能,g·mm²·ms⁻²·mol⁻¹;气体常数,

$g \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{ms}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; ρ 代表了压力,MPa; $\frac{\partial v_x}{\partial y}$ 对应了应变率,ms⁻¹; l_f 代表了摩擦生热的影响区域,mm。

该热传导模型考虑了炸药Arrhenius化学反应($\rho_f \Delta H Z e^{-\frac{E}{RT}}$)和摩擦生热 $\mu \rho \frac{\partial v_x}{\partial y}$ 共同作用引起的温度变化。只有裂纹表面的最大剪切应力大于最大静止摩擦力和裂纹处于闭合状态下,裂纹表面才发生相对滑动并使材料温度升高。公式中的压力 ρ 和应变率 $\frac{\partial v_x}{\partial y}$ 由材料本构方程(1)计算得到,因此,将其代入公式(2)中,联合公式(3),可以确定材料单元温升。

2.2 低速撞击Steven试验模拟

本研究应用Visco-SCRAM模型对标准的Steven撞击试验进行数值模拟。整个模型的剖面结构如图1所示。炸药被放置于钢壳和盖板之间。聚四氟乙烯环被放置于炸药、钢壳侧壁和盖板之间。弹体形状是圆形。模型各部件的尺寸均与标准的Steven撞击试验一致。炸药尺寸为 $\Phi 98 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$,聚四氟乙烯环的宽度为16 mm,盖板的厚度为3.5 mm。圆形弹的质量为2 kg,半径为31 mm。考虑模型的对称性,采用1/4三维计算模型代替完整结构计算,以节省计算时间。

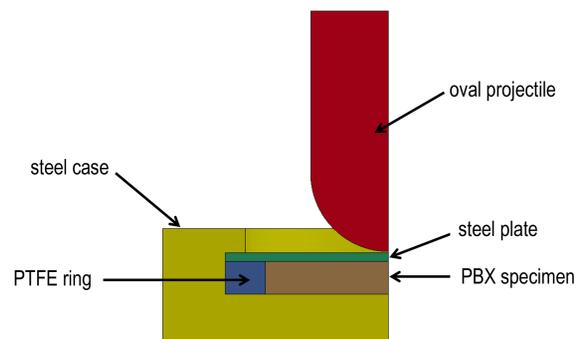


图1 Steven试验有限元模型

Fig. 1 The finite element model of Steven test

2.3 Visco-SCRAM模型验证

早期的工作^[20]详细描述了Visco-SCRAM模型参数的标定过程。由于Visco-SCRAM模型含有复杂的模型参数,参数标定工作需要较宽应变率范围的材料力学响应曲线。在Bennett的工作基础上,结合HMX为基的PBX炸药低速撞击Steven试验中的压力历史曲线和点火速度阈值,获得了一套适用于该工况下的模型参数(如表1所示)。该套参数很好地预测了低速撞击Steven试验中材料尺寸效应对点火的影响以及材料内部温升规律。因此,在该套参数基础上,分析初始裂纹特征长度和初始裂纹非均匀性对低速撞击

下PBX炸药点火的影响。其中,模型中材料参数 a 代表了初始裂纹信息。本研究考虑初始裂纹特征长度的变化,即 $a=1, 2$ mm和 $a=3$ mm三种情况。另外,考虑初始裂纹非均匀性特征,假设其分别满足均匀分布 $U(0.8, 1.2)$ 和正态分布 $N(1, 0.115)$ 。该两类分布具有相同的期望和方差,且期望与不考虑初始裂纹分布 $a=1$ mm相同。值得强调的是,初始裂纹特征长度 $a=1$ mm作为基准模型参数,其他工况下的计算结果与该基准模型参数的计算结果进行比对。

表1给出了Visco-SCRAM模型(式(1))和热点模型(式(2)和式(3))中的HMX基PBX炸药材料参数^[11,20]。

表1 Visco-SCRAM模型和热点模型材料参数

Table 1 The materials parameters of Visco-SCRAM model and hotspot model

v	0.3	G_1 / MPa	224	$(1/\tau^1) / \text{ms}^{-1}$	0
a / mm	1	G_2 / MPa	173.8	$(1/\tau^2) / \text{ms}^{-1}$	7.32
m	10	G_3 / MPa	521.2	$(1/\tau^3) / \text{ms}^{-1}$	73.2
c_0 / mm	0.03	G_4 / MPa	908.5	$(1/\tau^4) / \text{ms}^{-1}$	732
$v_{\max} / \text{mm} \cdot \text{ms}^{-1}$	12	G_5 / MPa	687.5	$(1/\tau^5) / \text{ms}^{-1}$	2000
$K_0 / \text{MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$	15.8				

3 计算结果与讨论

3.1 初始裂纹特征长度对温升的影响

图2给出了圆形弹速度 $v=45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 撞击条件下,

具有不同初始裂纹特征长度($a=1, 2$ mm和 $a=3$ mm)的HMX基PBX炸药温升随时间变化云图。其中,撞击速度 $v=45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 是该类炸药的点火速度阈值,初始裂纹特征长度 $a=1$ mm是该撞击条件下的标定结果^[18]。调节参数 $a=2$ mm和 $a=3$ mm,计算结果与 $a=1$ mm的计算结果进行比对。计算结果表明,对于圆形弹,随着初始裂纹特征长度的增加,炸药温升的区域特征并没有发生明显变化,即温升区域主要集中于炸药变形区域,但是,炸药中心轴附近区域在整个撞击过程中,并没有显著温升,随后进一步给出详细的解释。相对较高温度区域并不存在于炸药温升区域的边界上,而是存在于大致距离中心轴距离 $4.5 \sim 7$ mm的区域内。如图2所示,在同一时刻的炸药温升云图表明初始裂纹特征长度对温升具有明显影响。初始裂纹特征长度的增加有利于炸药内部微裂纹表面摩擦生热。

为了进一步认识初始裂纹特征长度对温升的影响,比较了炸药不同位置温升历史曲线。总共选取了9个特征位置,如图3所示,分别对应了炸药上表面单元 A, B, C ,其中, $AB=5$ mm, $AC=14$ mm,炸药内部位置单元 D, E, F ,其中, $AD=6.5$ mm, $DE=5$ mm, $DF=14$ mm,以及炸药下表面单元 G, H, K ,其中, $GH=3$ mm, $GK=5.5$ mm。

图4给出了在不同的初始裂纹特征长度条件下,上述9个特征位置的温升历史曲线。在低速撞击中,上表面单元温升最快,其中,单元 B 的温升最明显,意

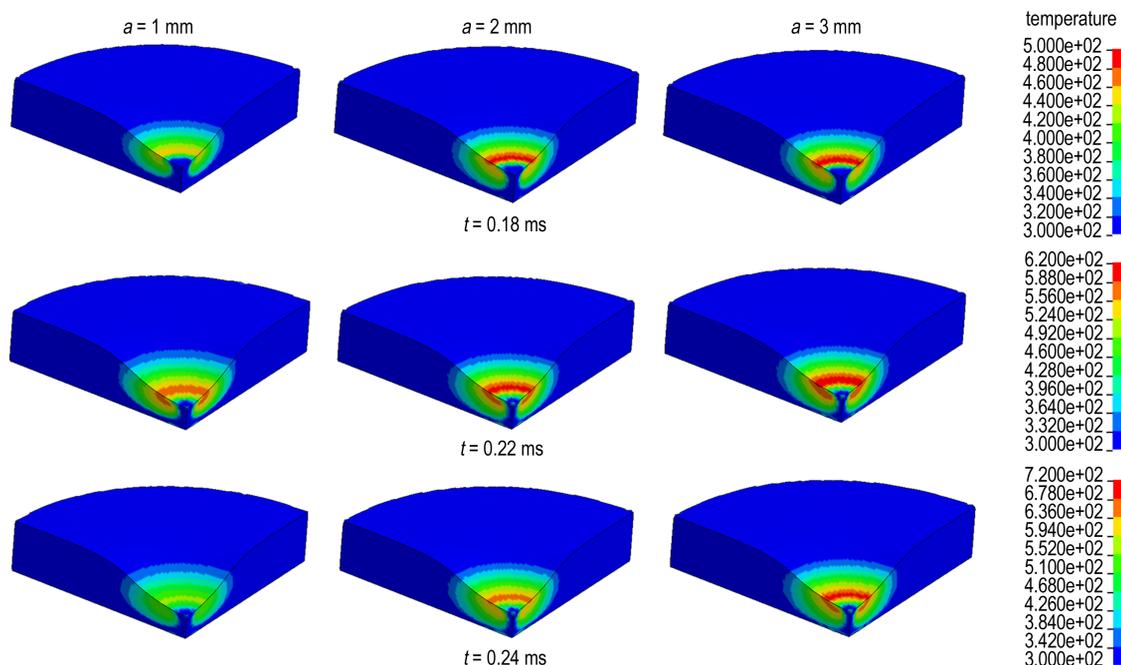


图2 不同初始裂纹特征长度条件下炸药温升云图($v=45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 2 The temperature rise distribution in case of different initial crack feature size ($v=45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

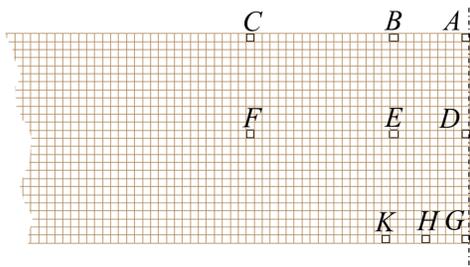


图3 炸药温升特征点位置示意图

Fig. 3 The schematic of the temperature rise positions of explosives

意味着该点首先达到点火条件。如图4a所示,当 $a=3\text{ mm}$ 时,单元B在温度达到约700 K时,存在明显的温度拐点,温升速率显著加快,炸药处于点火状态。在温度拐点出现之前,炸药温升主要来自材料内部裂纹表面摩擦生热。当温度上升到拐点处时,Arrhenius化

学反应项 $\Delta HZe^{-\frac{E}{RT}}$ 起主导作用,导致温度急剧加速增长。对于炸药内部单元而言,依然存在一定程度的温升。值得注意的是,处于中心轴单元D并没有明显温升效应。由一维Frank-Kamenetskii热传导模型(2)和(3)可知,摩擦生热的本质是裂纹表面在剪切作用下的滑移造成。单元D处于中轴线,主要以体积变形为主,剪切引起单元畸变并不明显,因此,裂纹表面不容易出现滑移。对于底部单元G,H和K,材料与钢壳相互作用,发生单元畸变,同样存在温升效应。同时,随着初始裂纹特征长度的增加,材料温升越容易。计算结果表明,当初始裂纹 $a=1\text{ mm}$ 增加为 $a=2\text{ mm}$ 时,温升大幅提高。当初始裂纹 $a=2\text{ mm}$ 增加为 $a=3\text{ mm}$ 时,温升有一定程度地增加。初始裂纹特征长度对温升的影响并不是线性对应的关系。

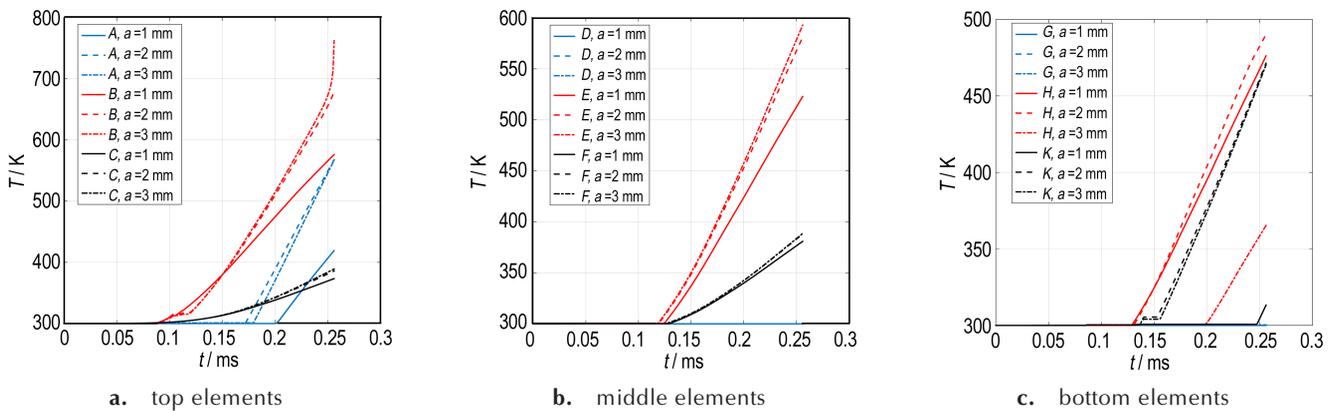


图4 炸药不同位置的温升曲线

Fig. 4 The temperature rise history at different positions of the explosion

3.2 初始裂纹特征长度对点火速度阈值的影响

对于Steven撞击试验而言,点火速度阈值是评价炸药安全性的重要指标。既然初始裂纹特征长度能够影响温升过程,进而初始裂纹特征长度对点火速度阈值也有影响。图5给出了初始裂纹特征长度与点火速度阈值的关系。计算结果表明,初始裂纹特征长度 $a=1, 2\text{ mm}$ 和 $a=3\text{ mm}$ 分别对应了点火速度阈值 $v=45, 40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $v=38\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这意味着随着初始裂纹特征长度的增加,点火速度阈值降低。这与Idar等^[8], Chidester等^[9]以及孙宝平等^[10]的实验和数值模拟研究工作一致,即随着裂纹的累积,PBX炸药更容易发生点火。本研究进一步量化了初始裂纹特征长度与点火速度阈值的关系。

就本质而言,初始裂纹特征长度描述了炸药内部的裂纹情况。初始裂纹特征长度的增加对应了炸药内部微裂纹的数目或者尺寸的增加。更多的裂纹数目或

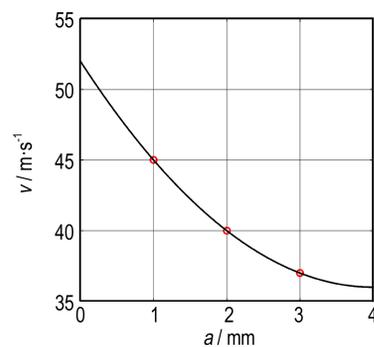


图5 初始裂纹特征长度与点火速度阈值关系

Fig. 5 The relationship between the initial crack feature size and the ignition velocity threshold value

者更大的微裂纹尺寸更有利于裂纹的扩展和裂纹表面摩擦产生热点,导致点火速度阈值的降低。公式(4)给出了初始裂纹特征长度的计算公式^[11]:

$$AN_0 = \frac{1}{a^3} \quad (4)$$

式中, A 代表了常数, N_0 代表了初始裂纹的分布函数。

其实, 对于 Visco-SCRAM 模型而言, 忽略了对初始裂纹分布的具体形式的探讨, 通过用名义上具有一定物理意义的初始裂纹特征长度 a 描述初始裂纹的统计信息。值得注意的是, 初始裂纹在炸药内部的分布具有明显的随机性。这种随机性有可能使初始裂纹特征长度 a 在炸药不同空间位置也呈现出随机性。因此, 进一步地探讨初始裂纹特征长度 a 的具体形式是有意义的。

3.3 初始裂纹分布对温升的影响

为了研究初始裂纹分布对 HMX 基 PBX 炸药低速撞击过程中的温升影响, 考虑两种典型的随机分布形式, 即均匀分布和正态分布, 如公式(5)所示:

$$a = f(x) \quad (5)$$

式中, a 代表了 Visco-SCRAM 模型中初始裂纹长度, $f(x)$ 代表了初始裂纹随机分布抽象形式。

同时, 上述初始裂纹特征长度 $a=1$ mm 作为基准模型, 因此, 均匀分布和正态分布的期望均为 1 mm。进一步假定均匀分布形式满足 $U(0.8, 1.2)$, 表示初始裂纹长度在 0.8~1.2 mm 区间均匀变化。正态分布形式满足 $N(1, 0.115)$, 表示初始裂纹长度期望是 1 mm, 其方差 0.115 mm, 和均匀分布 $U(0.8, 1.2)$ 具有相同的期望和方差。

通过随机生成方法, 产生服从均匀分布 $U(0.8, 1.2)$ 和正态分布 $N(1, 0.115)$ 的随机数, 并分配给 PBX 炸药的单元, 作为单元的初始裂纹特征长度。图 6 给出了初始裂纹分布云图, 从云图中可以看出, 均匀分布 $U(0.8, 1.2)$ 和正态分布 $N(1, 0.115)$ 明显反应出初始裂纹空间分布的非均匀特征。

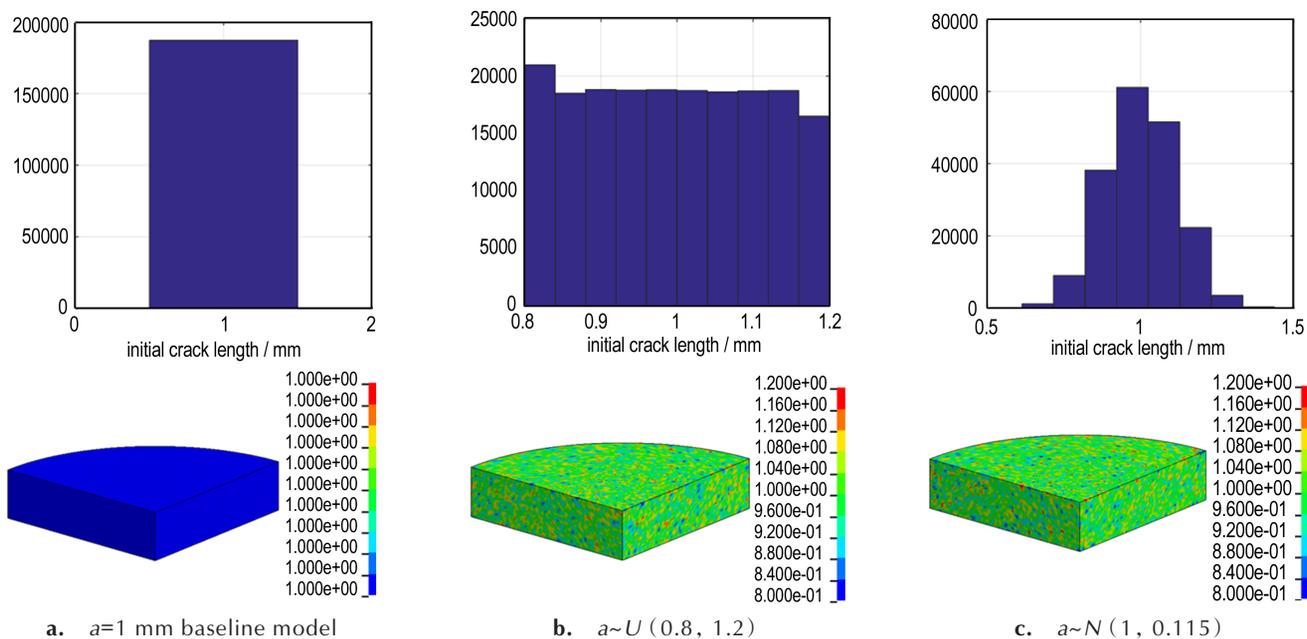


图 6 不同类型的初始裂纹分布特征

Fig. 6 The characteristic of different types of the initial crack distribution

图 7 给出了 HMX 基 PBX 炸药发生点火时温度分布云图。计算结果表明, 初始裂纹分布明显影响了低速撞击过程中炸药内部温升云图。针对 $a=1$ mm 基准模型, 中心轴附近单元处于压缩状态, 没有明显剪切变形, 进而无明显摩擦导致温升。热点区域位于 PBX 炸药上表面和靠近炸药上表面区域。针对初始裂纹服从均匀分布 $U(0.8, 1.2)$ 和正态分布 $N(1, 0.115)$, 中心轴附近单元存在明显温升现象。这是因为模型中每个单元对应不同的初始裂纹特征长度, 根据 Visco-SCRAM 模型可知, 每个单元的变形存在差异性, 考虑

相邻单元的共用节点具有连续性, 单元之间的变形差异容易导致单元产生剪切变形, 进而诱导裂纹表面摩擦温升。尽管不同初始裂纹分布条件下高温区域形状仍然类似于基准模型情况, 但是热点形成位置不同。对于初始裂纹服从均匀分布 $U(0.8, 1.2)$, 如图 7b 所示, 存在两个热点点火位置, 分别位于炸药上表面和炸药中部靠近轴线位置。对于初始裂纹服从正态分布 $N(1, 0.115)$, 如图 7c 所示, 存在一个热点点火位置, 位于炸药中部靠近轴线位置。

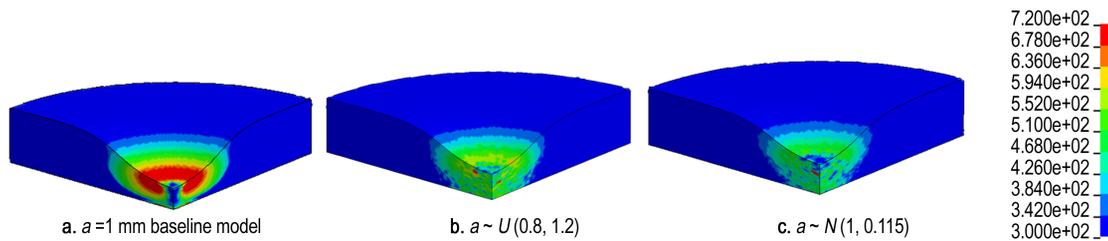


图7 HMX基PBX炸药发生点火温度分布

Fig. 7 The temperature distribution of HMX-based PBX when the ignition occurred

3.4 初始裂纹分布对点火速度阈值的影响

初始裂纹分布对温升影响明显,进而对点火速度阈值影响同样明显。图8给出了不同初始裂纹分布条件下的点火速度阈值变化规律。 $a=1$ mm基准模型条件下,其点火速度阈值为 $45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。初始裂纹服从均匀分布 $U(0.8, 1.2)$ 条件下,其点火速度阈值为 $36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而初始裂纹服从正态分布 $N(1, 0.115)$ 条件下,其点火速度阈值为 $31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由此可知,初始裂纹非均匀性特征能够明显降低点火速度阈值。当初始裂纹正态分布具有和均匀分布相同的期望和方差时,初始裂纹正态分布对应更低的点火速度阈值。对于正态分布 $N(1, 0.115)$,初始裂纹特征长度范围大于均匀分布 $U(0.8, 1.2)$ 的范围,这造成单元变形行为差异性增加,更加有利于单元剪切变形,进而导致裂纹表面摩擦温升更明显。

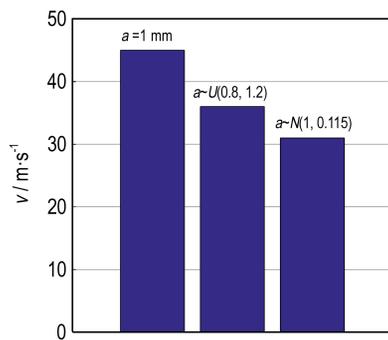


图8 不同初始裂纹分布条件下的点火速度阈值

Fig. 8 The threshold ignition velocity with different initial crack distribution

尽管上述系列计算结果获得了初始裂纹的非均匀性对PBX炸药低速撞击点火的影响规律,但是该问题所包含的物理机制非常复杂,仍然需要进一步开展试验和计算相结合的研究工作。特别是,需要开展炸药内部初始裂纹的非均匀性的定量表征的研究。有可能初始裂纹的非均匀性分布服从更为复杂的分布形式或者初始裂纹的非均匀性分布具有明显突变特性,都为PBX炸药低速撞击点火的预测带来巨大的挑战。

4 结论

(1) 初始裂纹特征长度明显地影响炸药温升过程。随着初始裂纹特征长度的增加,撞击过程中PBX炸药温升明显增强。由一维Frank-Kamenetskii热传导模型可知,在温升出现拐点之前,温升主要由摩擦生热引起。

(2) 初始裂纹特征长度的增加导致撞击过程中炸药内部裂纹更容易扩展,裂纹表面的滑移运动更明显,这有利于摩擦生热的累积。但是,在相同弹形作用下,PBX炸药变形几何区域不会发生明显的变化,进而并不会导致温升区域的改变。

(3) 初始裂纹特征长度改变引起温升改变呈现非线性特征。随着温升的快速累积,炸药点火的速度阈值会降低。计算结果表明,当初始裂纹特征长度 $a=1$ mm增加到 $a=3$ mm时,点火速度阈值从 $45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降低到 $38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(4) 初始裂纹非均匀性明显地影响炸药温升区域。本质上,初始裂纹非均匀性使各单元动态力学行为存在一定差异性,进而导致单元的剪切变形明显,并增强裂纹表面的滑移摩擦温升,最终导致点火速度阈值降低。当初始裂纹服从均匀分布 $U(0.8, 1.2)$ 时,点火速度阈值为 $36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。当初始裂纹服从正态分布 $N(1, 0.115)$ 时,点火速度阈值为 $31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] ASAY B W. Shock wave science and technology reference library Volume 5: non-shock initiation of explosives[M]. New York: Springer, 2000: 1-13.
- [2] Badgujar D M, Talawar M B, Mahulikar P P. Review of promising insensitive energetic materials[J]. *Cent Eur J Energ Mat*, 2017, 14: 821-843.
- [3] Horie Y. Hot spots, high explosives ignition, and material microstructure[J]. *Mater Sci Forum*, 2013, 767: 3-12.
- [4] FIELD J E, WALLEY S M, PROUND W G, et al. Review of experimental technique for high rate deformation and shock studies[J]. *Int J Impact Eng*, 2004, 30: 725-775.
- [5] 卢芳云, 林玉亮, 王晓燕, 等. 含能材料的高应变率响应实验[J]. *火炸药学报*, 2006, 29(1): 1-4.

- LU Fang-yun, LIN Yu-liang, WANG Xiao-yan, et al. Experimental Investigation on dynamic response of energetic materials at high strain rate[J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2006, 29(1): 1-4.
- [6] VANDERSALL K S, CHIDESTER S K, FORBES J W, et al. Experimental and modeling studies of crush, puncture, and perforation, scenarios in the Steven impact test[C]//12th International Symposium on Detonation, 2002: 131-139.
- [7] 代晓淦, 申春迎, 文玉史, 等. Steven 试验中不同形状弹头撞击下炸药响应规律研究[J]. 含能材料, 2009, 17(1): 50-54.
DAI Xiao-gan, SHEN Chun-ying, WEN Yu-shi, et al. Reaction rule for explosive under different shape warhead impact in Steven test[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2009, 17(1): 50-54.
- [8] IDAR D J, STRAIGHT J W, OSBORN M A, et al. Low amplitude impact of damaged PBX9501 [C]//AIP Conf Proc, 2001: 655-658.
- [9] CHIDESTER S K, TARVER C M, DEPIERO A H, et al. Single and multiple impact ignition of new and aged high explosives in the Steven impact test[C]//AIP Conf Proc, 1999: 886-896.
- [10] 孙宝平, 段卓平, 刘彦, 等. 破片撞击损伤装药点火数值模拟研究[J]. 含能材料, 2019, 27(3): 178-183.
SUN Bao-ping, DUAN Zhuo-ping, LIU Yan, et al. Numerical simulation and damaged charge ignition by fragment impact [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2019, 27(3): 178-183.
- [11] BENNETT J G, HABERMAN K S, WILLIAMS T O, et al. A constitutive model for the non-shock ignition and mechanical response of high explosives[J]. *J Mech Phys Solids*, 1998, 46: 2303-2322.
- [12] 楼建锋, 张延耿, 洪滔, 等. 基于微裂纹界面摩擦生热的点火模型[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(6): 807-811.
LOU Jian-feng, ZHANG Yan-geng, HONG Tao, et al. Study on the model of hot-spot ignition based on friction generated heat on the microcrack face[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(6): 807-811.
- [13] Yang K, Wu Y Q, Huang F L. Numerical simulations of microcrack-related damage and behavior of mild-impacted polymer bonded explosives[J]. *J Hazard Mater*, 2018, 356: 34-52.
- [14] Borne L. Explosive crystal microstructure and shock sensitivity of cast formulations[C]//11th International Detonation Symposium, 1998: 657-663.
- [15] Skidmore C B, Phillips D S, Howe P M, et al. Romero J.A.. The evolution of microstructural changes in pressed HMX explosives[C]//11th International Detonation Symposium, 1998: 556-564.
- [16] 陈鹏万, 黄风雷. 含能材料损伤理论及应用[M]. 北京理工大学出版社, 2006.
CHEN Peng-wan, HUANG Feng-lei. The damage theory and application of energetic materials [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006.
- [17] 傅华, 李克武, 李涛, 等. 非均质结构PBX炸药的动态压缩过程模拟[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36: 17-23.
FU Hua, LI Ke-wu, et al. Simulation of dynamic compression of plastic-bonded explosives considering heterogeneous structure[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36: 17-23.
- [18] Barua A, Horie Y, Zhou M. A Lagrangian framework for analyzing microstructure level response of polymer-bonded explosives[J]. *Model Simul Mater Sc*, 2011, 19(5): 055001.
- [19] Frank-Kamenetskii A A. On the mathematical theory of thermal explosions [J]. *Acta Physicochim Urs*, 1942, 16: 357-361.
- [20] LIU R, CHEN P W. Modeling ignition prediction of HMX-based polymer bonded explosive under low velocity impact [J]. *Mech Mater*, 2018, 124: 106-117.

Numerical Simulation on the Influence of the Initial Crack on Polymer Bonded Explosive Ignition Under Low Velocity Impact

LIU Rui, HAN Yong, DAI Xiao-gan, LI Ming, WANG Jun

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: Visco-SCRAM model was applied to study on the influence of the initial crack on Octogen (HMX)-based polymer bonded explosive (PBX) ignition under low velocity impact. By means of the simulation of the standard low impact Steven test, the influence of the initial crack length and its distribution on the temperature rise and the hotspot formation was analyzed. The simulation results demonstrate that as the increment of the initial crack length, the friction work between the surfaces of the micro-cracks is strengthened, which brought in high temperature rise and further the hotspot is formed more easily. When the initial crack length is increased from 1mm to 3mm, the ignition impact threshold velocity is reduced from $45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ to $38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Considering the heterogeneous initial crack, during the low velocity impact, the temperature rise region is obviously changed. Moreover, the hotspot formation is beneficial of the heterogeneous initial crack, and further it resulted in the reduction of the ignition impact threshold velocity. When the distribution of the initial crack follows the uniform distribution $U(0.8, 1.2)$, the ignition impact threshold velocity is $36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. When the distribution of the initial crack follows the normal distribution $N(1, 0.115)$, the ignition impact threshold velocity is $31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Key words: explosion mechanics; initial crack; polymer bonded explosive; low velocity impact; ignition velocity threshold

CLC number: O389

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019152

(责编: 高毅)